

배터리 셀 간 SOC 불균형 해소를 위한 분산 충전 회로 및 제어

정의락¹, 지상혁¹, 정승훈², 배성우^{1*}

¹한양대학교, ²연암공과대학교

Distributed Charging Circuit and Control Method for Battery Cell SOC Equalization

Eurak Jeong¹, Sanghyuk Ji¹, Seunghoon Chung², and Sungwoo Bae^{1*}

¹Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

²Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonam Institute of Technology

ABSTRACT

본 논문은 배터리 셀 충전상태(State-Of-charge, SOC) 불균형을 해소하기 위한 셀 분산 충전 회로 및 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방법은 분산 충전과 개별 셀의 충전 전류 제어를 통해 셀들이 충전되며 SOC 불균형을 해소한다. 제안하는 방식은 기존 수동형 밸런싱 방법보다 빠르게 모든 셀의 SOC를 일치시킨다. 본 논문에서 제안하는 방법은 PSIM 환경에서 수동형 밸런싱 방법과 비교해 우수성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과 제안하는 회로 및 제어 알고리즘은 수동형 밸런싱 방법보다 1292초 더 빠르게 모든 셀이 같은 SOC에 도달하였다.

1. 서론

배터리는 전기자동차, 에너지 저장 장치 및 소형 전자기기 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 배터리 셀은 각 기기의 필요 전압, 전류 및 전력에 따라 직렬 또는 병렬로 연결되어 사용된다. 이때, 연결된 배터리 셀들은 작동 온도, 내부 전기화학 특성 등의 요인으로 인해 충전상태(State-of-Charge, SOC)의 불균형이 생기게 된다. SOC 불균형으로 인해 배터리의 과충전, 과방전 또는 사용 가능 배터리 용량 저하와 같은 배터리 시스템 성능 저하가 발생한다. SOC 불균형 상태가 지속되면 배터리 화재와 같은 심각한 사고를 유발할 수 있다.

SOC 불균형 문제를 해결하기 위해 다양한 방법이 제안되었다^[1]. 먼저 SOC 불균형을 해소하기 위한 기준점으로 셀의 단자전압을 이용하는 방법과 셀의 추정 SOC를 이용하는 방법으로 나뉜다. 전압을 일치시키는 방법은 간단하지만, 실제 SOC와 단자전압의 괴리로 인해 부정확한 성능을 보인다. SOC를 일치시키는 방법은 SOC를 추정하는 알고리즘이 필요하지만, 정확한 성능을 보인다. 다음으로 SOC 불균형 해소를 수행하는 방법은 과잉된 에너지를 소모하는 방법, 셀 간 에너지를 이동시켜 불균형을 해소하는 방법, 충·방전 제어를 통해 균형을 이루는 방법으로 구분된다. 과잉된 에너지를 소모하는 방법은 수동형 밸런싱이라고 하며 셀마다 병렬 연결된 저항을 활용한다. 해당 방법은 구현이 간단해 많이 채택되고 있지만, 에너지 손실과 발열이 크고 셀 밸런싱 속도가 느리다. 셀 간 에너지를 이동시키는 능동형 밸런싱은 빠르게 SOC 불균형을 해소할 수 있지만, 추가 회로로 인한 복잡성 및 비용 문제가 있다. 충·방전 제어를 통한 SOC 불균형 해소 방법은 셀의 에너지를 소모

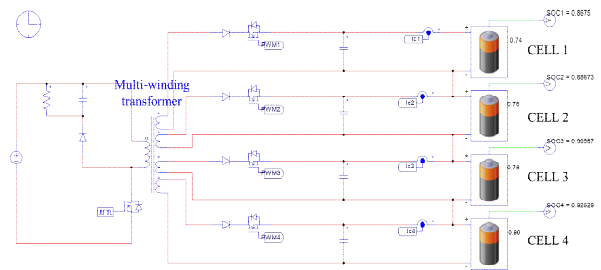


Fig. 1 SIMO flyback based cell distributed charging circuit

하거나 이동시키지 않으며, 밸런싱을 위한 시간을 추가로 할애할 필요가 없다.

본 논문에서는 SOC 불균형 해소 시간 단축을 위한 SOC 기반 분산 충전 방법을 제안한다. 제안하는 방법의 회로는 단일 입력 다중 출력(Single Input Multi Output, SIMO) 플라이백 컨버터를 응용하여 분산 충전을 수행한다. 제어 알고리즘은 전류 적산법을 통해 SOC를 추정하고, 추정된 SOC에 따라 셀의 충전 전류를 개별적으로 제어해 충전 속도에 차등을 두어 동일 시점에 모든 셀이 동일한 SOC에 도달할 수 있도록 한다^[2].

2. 분산 충전을 통한 SOC 기반 셀 밸런싱

2.1 제안하는 방법

2.1.1 회로 구성

본 논문에서 제안하는 SIMO 플라이백 기반 셀 분산 충전 방법의 회로는 그림 1과 같다. 제안하는 회로는 다중 권선 변압기를 통해 직렬 연결된 다수의 셀을 분산 충전한다. 각 셀에는 충전 전류 조절을 위한 MOSFET과 역전류 방지용 다이오드가 연결된다. MOSFET은 제안하는 제어 알고리즘에 의해 각 셀의 충전 속도를 제어하도록 동작한다.

2.1.2 제어 방법

그림 2 제안하는 분산 충전의 제어 알고리즘이다. 제어 방법의 시퀀스는 다음과 같다. 먼저, 셀이 현재 보유 전하량($Q_n(0)$)에서 목표 SOC의 전하량($Q_{n,target}$)에 도달할 때까지 필요한 전하량($Q_n(t)$)을 셀 충전 전류($I(t)$)의 적분을 통해 계산한다. $Q_n(t)$ 를 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$Q_n(t) = Q_{n,target} - Q_n(0) - \int_0^t I(t) dt \quad (1)$$

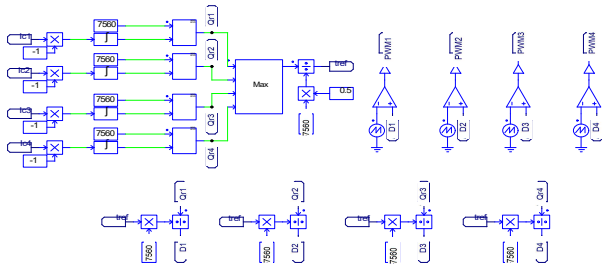


Fig. 2 Cell distributed charging control algorithm

n개의 셀 중 가장 낮은 SOC의 셀이 $Q_{n,target}$ 에 도달하기 위해 필요한 전하량(Q_{max})을 수식 (2)를 통해 선정한다.

$$Q_{\max}(t) = \text{MAX}(Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_n(t)) \quad (2)$$

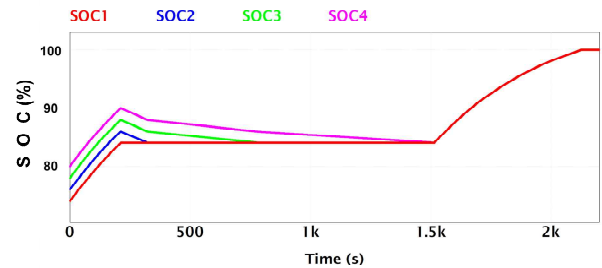
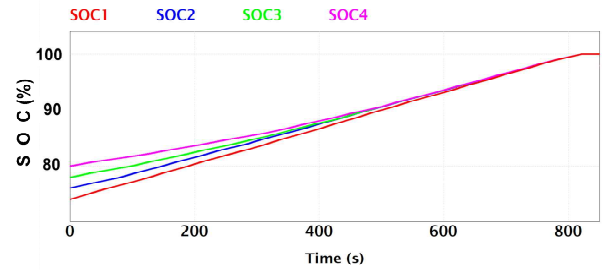


Fig. 4 Constant voltage charging passive balancing simulation result

4. 결론

본 논문에서는 배터리 셀 간 SOC 불균형 해소를 위해 SIMO 플라이백 기반 셀 분산 충전 회로 및 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방법의 우수성을 검증하기 위해 PSIM 환경에서 수동형 셀 밸런싱 방법과 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 방법은 수동형 셀 밸런싱 방법에 비해 1292초 더 빠르게 모든 셀의 SOC가 100%에 도달하였다. 제안하는 방법은 충전과 방전의 반복이 잦은 기기 혹은 SOC 불균형이 크게 나타나는 기기에서 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

향후 연구에서는 SIMO 플라이백 기반 셀 분산 충전 시의 스위칭 손실과 펄스 충전 전류의 크기와 주기에 따른 셀의 노화에 대해 분석해 배터리 운용에 더욱 최적화된 충전 방법을 개발할 예정이다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022A4000000440, 섹터커플링 에너지산업 고도화 인력양성 사업)

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

제안하는 방법의 우수성을 검증하기 위해 PSIM 환경에서 수동형 밸런싱 방법과 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 셀의 사양은 3.7V / 2.1Ah 로 선정하였고, 각각 0.74, 0.76, 0.78, 0.8의 초기 SOC를 갖는 4개의 셀을 직렬로 연결하였다. 수동형 셀 밸런싱 저항의 크기는 3 Ω 이 사용되었으며, 정전압 충전이 진행된다. SIMO 플라이백 기반 셀 분산 충전의 D_{max} 는 0.5이며 36V 입력 전원과 1:1의 권선비가 사용됐다. 목표 SOC는 100%이고, 수동형 셀 밸런싱은 SOC가 가장 높은 셀이 90%에 도달하면 수행되도록 설계하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 3은 제안된 방법의 시물레이션 결과이다. 모든 셀은 각자 다른 속도로 분산 충전되어 832초에 목표 SOC에 도달한다. 그림 4는 수동형 셀 밸런싱 시물레이션 결과이다. 하나의 셀이 SOC 90%가 되는 순간인 210초에 수동형 셀 밸런싱이 수행되어 1517초에 수동형 셀 밸런싱이 완료된 후, 다시 충전이 진행되어 2124초에 모든 셀의 SOC가 100%에 도달하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Qi and D. Dah-Chuan Lu, "Review of battery cell balancing techniques," 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, WA, Australia, 2014, pp. 1-6, 2014, September.
- [2] Movassagh, Kiarash, Arif Raihan, Balakumar Balasingam, and Krishna Pattipati. "A Critical Look at Coulomb Counting Approach for State of Charge Estimation in Batteries" *Energies* 2021, 14, , 4074, 2021, July.